

新型防潮堤(NS ハイウォール)の開発 ～鉄筋レス合成構造による高耐力化～

Development of NS-High Wall
～Strength improvement by Rebar-less composite structure～

大嶽 敦郎* Atsuo OTAKE
技術開発第一研究所 構造商品開発室
シニアマネジャー

櫻井 信彰 Nobuaki SAKURAI
技術開発第一研究所 構造商品開発室
室長

丸山 栄 Sakae MARUYAMA
技術開発第一研究所 構造商品開発室
シニアマネジャー

抄 録

東日本大震災において津波による被害を受けた防潮堤の再整備が進められる中、津波高の見直しに伴う設計荷重の増加、東北地域における建設工事労務者の不足などの課題に対応した新しい形式の防潮堤が求められている。この度開発したハイブリッド型防潮堤「NS ハイウォール」については壁体に高耐力・高剛性・施工の省力化が可能な鉄筋レス合成構造を採用し、実物大モックアップ試験体を用いた載荷実験を行って津波荷重作用時および地震荷重作用時における設計の妥当性、製作施工性に問題がないことを確認した。

Abstract

The Great East Japan Earthquake and the resulting tsunami brought serious damage on seawalls in the region. The fact encouraged re-evaluation of design load associated with the increased height of tsunami as design base. In addition, due to the lack of construction labor in the area, a new design that enables labor-saving and short construction period is appreciated after the disaster. NS-High Wall, hybrid type seawall developed by Nippon Steel Sumikin Engineering Co., Ltd adopts rebar-less composite structure with features of high-strength and high rigidity and labor-saving in wall section. Loading tests using a full-scale mock-up specimen were carried out to justify its design and workability.

1 緒言

東北地方では、平成23年3月11日の「東北地方太平洋沖地震」及び「大津波」で、甚大な被害を受けた防潮堤の復旧工事が始まっている。また、内閣府中央防災会議が公表した「南海トラフ巨大地震の被害想定」¹⁾では、津波高が20mを超える推定結果も公表され、東南海地域の津波対策にも注目が集まっている。

従来の防潮堤は、緩い勾配で盛土を行う傾斜堤、躯体の自重で津波に抵抗する直立堤、躯体をL型

(あるいは逆T)形状として部材を鉄筋コンクリート断面で構成し杭基礎で支持する構造などが採用されてきた。一方で、想定津波高の見直しに伴い津波荷重が増加していること、東北地域における建設工事労務者や生コンクリートが不足していること、臨港道路や生活区域等の周辺環境にできるだけ影響を与えないよう配慮する必要があること、などの課題が顕在化しており、これらに対応した新しい形式の防潮堤が望まれている。そこで、平成24年度に開発を開始し、早期に市場投入することを目的として、ハイブリッド防潮堤「NS ハイウォール」を開発した。

* 〒293-0011 千葉県富津市新富20-1 Tel : 0439-80-4389

その概念図を図1に示す。「NS ハイウォール」は、鋼・コンクリートのハイブリッド構造の防潮堤製品であり、壁体に鋼殻を用いて所要高さまで内部コンクリートを充填した高剛性の壁体を有する。「NS ハイウォール」の主な特徴を以下に示す。

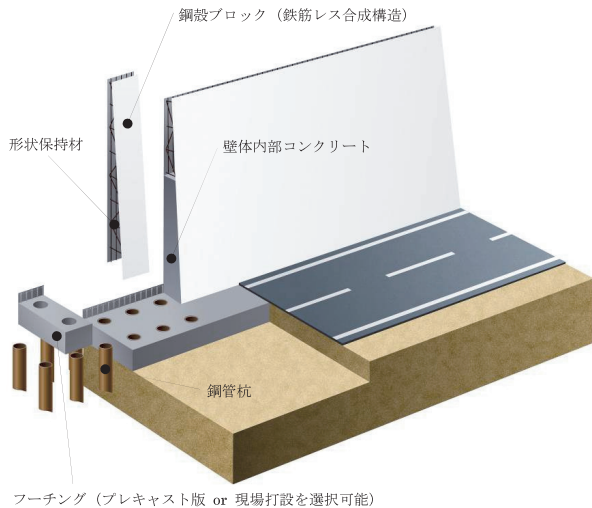


図1 NS ハイウォール概念図
Fig. 1 Outline drawing of NS-High Wal

(1) 高剛性・省スペース

壁体部の鉄筋レス合成構造は、鋼・コンクリートの合成効果により従来工法の鉄筋コンクリート構造と比べて高剛性であり、より大きい津波荷重へ対応することや省スペースとすることが可能である。

(2) 省力化・短工期化

プレファブ化された鋼殻ブロックは軽量であるため、小さな重機で架設することができ、省力化・狭隘地施工が可能である。また、従来工法の鉄筋コンクリート現場打ち構造に比べて、壁体部の型枠、配筋作業、枠組足場などが不要であり大幅な工期短縮が可能である。津波荷重が小さい頂部近傍では内部コンクリートを打設せず中空断面とし、コンクリートの使用量を削減することが可能である。

(3) 自由度の高い設計

鋼殻ブロックは、形状や色彩、採光窓・出入口扉などの設置と、自由度の高い設計が可能である。また、フーチングでは現地状況に応じてプレキャスト化することも可能である。

この「NS ハイウォール」の商品化に際しては、鉄筋レス合成構造の採用による高耐力化を実現するために、壁体とフーチングの異種部材の接合部につい

て応力伝達機構(設計計算の妥当性)や製作施工性の検証を行う必要があると考え、実物大モックアップ試験体を用いた載荷試験を実施した。本稿ではNS ハイウォールの構造および設計手法、載荷試験による設計方法の妥当性検証結果を示す。

2 NS ハイウォールの構造と設計方法

2.1 構造

(1) 壁体

壁体部の鋼殻ブロックは、予め縦リブを工場溶接した鋼板を形鋼で製作した形状保持材で連結しブロック化する。鋼殻ブロック内部には、現地でコンクリートを打設する。

(2) 隅角部

壁体とフーチングの隅角部のイメージ図を図2に示す。海側鋼板はスタッドでフーチング側面に固定され、壁体部の鋼板と高力ボルト摩擦接合で連結する。一方、陸側鋼板はフーチング内に連続させず、壁体下部で止める構造とする。陸側鋼板に生じた引張力については、壁体内部に配置した陸側鉄筋によりフーチングに伝える構造としている。

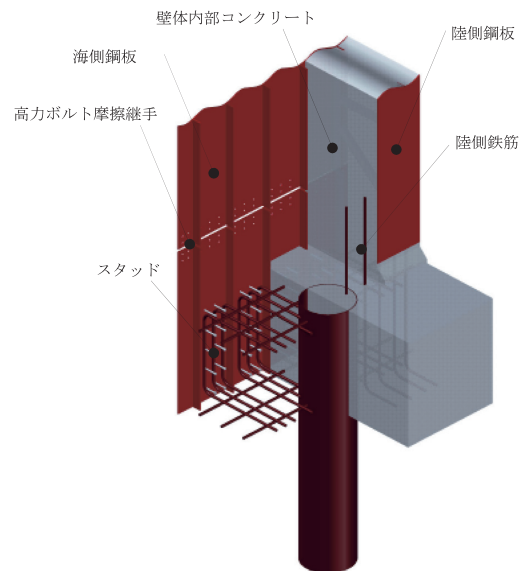


図2 隅角部の構造
Fig. 2 Structure of the corner

(3) フーチングおよび杭

フーチングは鉄筋コンクリート構造とし、杭は鋼管杭とする。フーチングと杭の結合は、プレキャスト版の場合はグラウト接合にて行い、現場打設の場

合は道路橋示方書・同解説 下部工編²⁾に示されている鋼管杭の接合方法とする。

2.2 設計方法

NSハイウォールにおける荷重伝達機構を図3に示す。荷重の作用方向は、「海→陸方向荷重」と「海←陸方向荷重」の2方向としており、「海→陸方向荷重」は津波荷重を想定したものである。本検討では津波荷重が壁体を越波しないケースを想定しているため、「海←陸方向荷重」は地震荷重を想定している。なお、荷重の大きさとしては津波荷重が地震荷重を大きく上回る。

壁体の断面照査については、「海→陸方向荷重」「海←陸方向荷重」とも、津波荷重や地震荷重による曲げモーメントが壁体基部で最も大きくなるため、壁体基部の部材耐力が発生断面力を上回る様に断面設計を行う。その際、陸側鋼板は壁体基部で不連続のため抵抗断面として考慮せず、陸側鉄筋のみを有効とする。「海→陸方向荷重」では海側鋼板が引張力を負担するので、壁面のスタッドは鋼板からコンクリートへ応力を伝達できるように必要本数を配置する。「海←陸方向荷重」では陸側鉄筋が引張力を負担するので、フーチング内部での定着長を確保する。

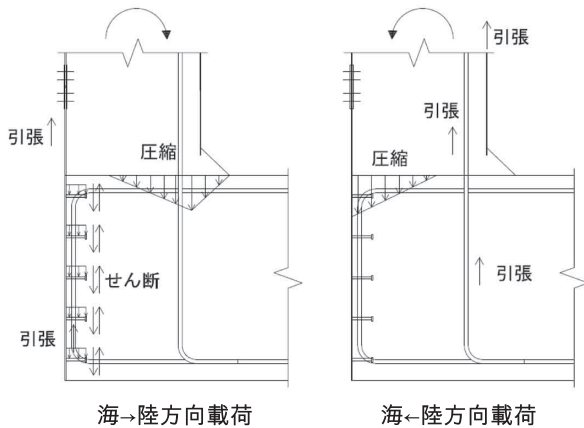


図3 隅角部の荷重伝達機構
Fig. 3 Load transfer mechanism

3 実物大モックアップ試験

3.1 試験概要

試験体は壁高さ約10mの防潮堤をモデルに、壁体高さを約半分としたものを2ブロック施工した。

試験体イメージを図4に示す。また、壁体内部のスタッドの要否を比較するため、図5に示すようにブロック1ではスタッドを配置し、ブロック2ではスタッドを配置しないものとした。なお、ブロック2では鋼板とコンクリートの摩擦の影響を排除するため、水平継手より上側の鋼板とコンクリートの接触面にテフロンシートを貼り付けている。水平継手より下側の隅角部の範囲にはテフロンシートを貼り付けずスタッドを配置している。

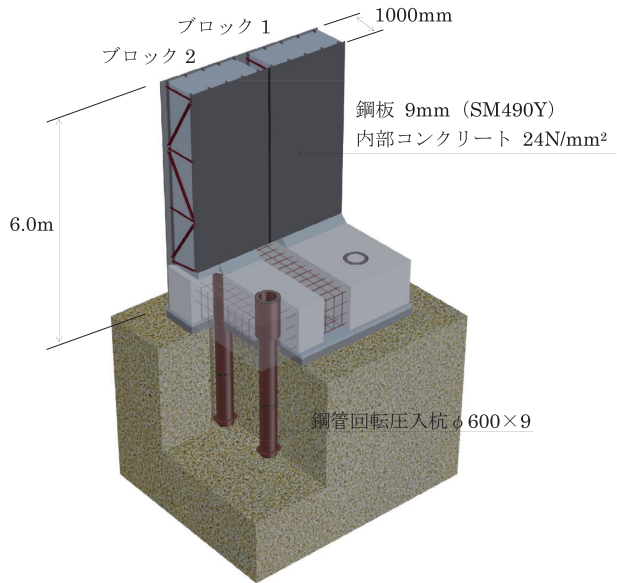


図4 実物大モックアップ試験体
Fig. 4 Mock-up test specimen

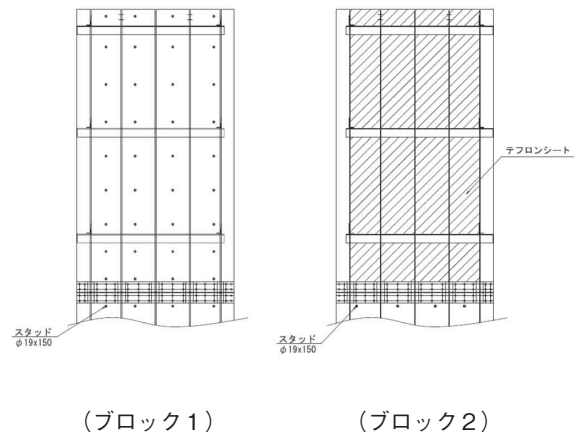


図5 スタッド配置
Fig. 5 Placement of stud

ここで、鋼殻ブロックの架設状況を図6に示す。隅角部の陸側鉄筋と鋼殻ブロックの取り合いや、海側鋼板の摩擦接合などについて、特に問題なく施工することができた。また内部コンクリート打設時においてバイブレーターなどの作業性に問題がないこ

とやコンクリートが確実に充填されていることを確認することができた。

荷重試験状況を図7に示す。「海→陸方向荷重」では、津波荷重を想定し、静水圧相当の荷重が作用した場合に弾性範囲内の応答を示すことを確認することとした。「海←陸方向荷重」では、荷重伝達機構を確認することのみを目的としてレベル1地震荷重相当の荷重を行った。荷重サイクルは図8に示すようにひび割れ荷重まで荷重・除荷した後、設計荷重まで荷重した。なお、荷重試験に際して津波荷重あるいは地震荷重の代わりとして、ジャッキにより壁体頂部に水平力を与えており、壁体基部の断面力が等価となるようにジャッキの牽引力を設定した。

荷重試験における計測点を図9に示す。壁体基部の剛性を把握するため、壁体頂部の水平変位を計測した。壁体基部の断面内ひずみ分布を確認するため、着目点A、着目点Bの位置(鋼管内面)にひずみゲージを設置した。フーチング側面の海側鋼板に



図6 施工状況
Fig. 6 Status of Construction



図7 静的荷重試験状況
Fig. 7 Static loading test

もひずみゲージを設置し、フーチングへの応力伝達の様子を確認することとした。

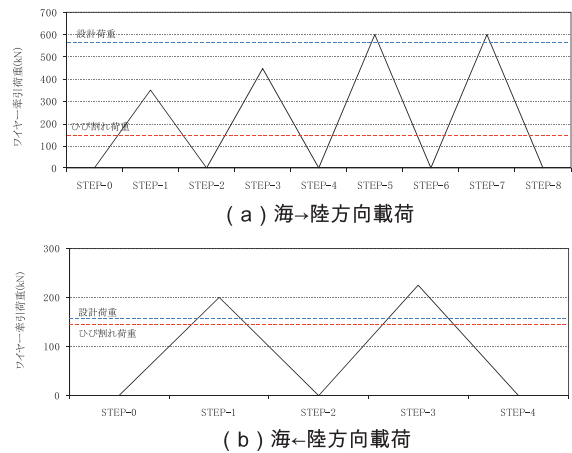


図8 荷重方法
Fig. 8 Load pattern

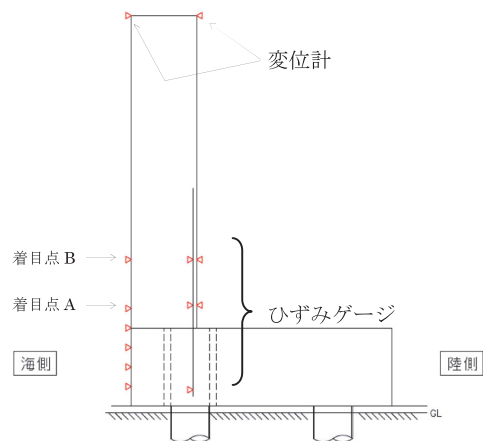


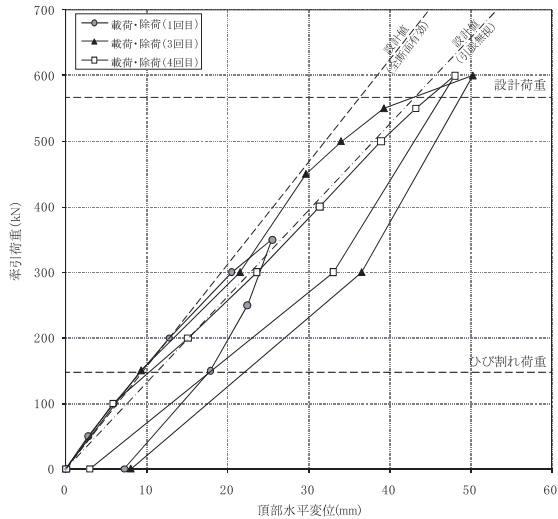
図9 計測箇所
Fig. 9 Measurement points

3.2 試験結果

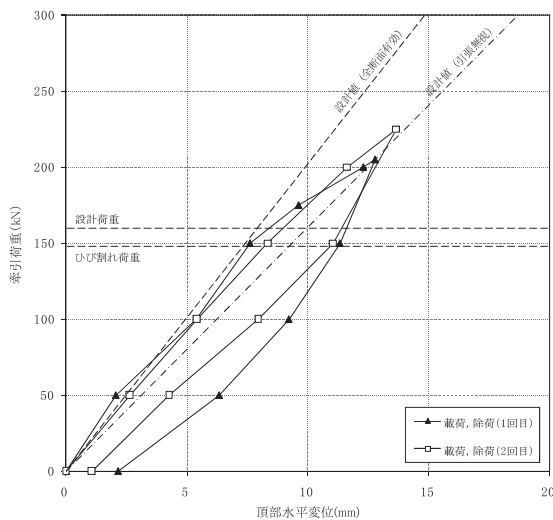
3.2.1 荷重-水平変位関係

図10に、ブロック2におけるジャッキの牽引荷重と壁体頂部の水平変位の関係を示す。図中に示す破線および一点鎖線は、壁体内部コンクリートを全断面有効とした場合と引張域のコンクリートを無視した場合の設計計算値を示したものである。この水平変位は、壁体の曲げ変形、杭の水平変位、フーチングの回転変形による水平変位の合計値であるため、杭の水平変位、フーチングの回転変形は設計計算上の仮定と実挙動が一致するように補正している。(a)海→陸方向荷重、(b)海←陸方向荷重とも1～4回目の荷重直後は全断面有効に近い挙動を示して

いる。1, 4回目の荷重と3回目の荷重で若干傾向は異なるが、いずれも荷重の増加に伴って引張無視の状態へ移行している様子が見られる。また、設計荷重に到達する段階では引張無視とした設計計算値と計測結果が良く一致する結果となっている。



(a) 海→陸方向荷重



(b) 海←陸方向荷重

図10 荷重変位関係
Fig. 10 Load-displacement relationship

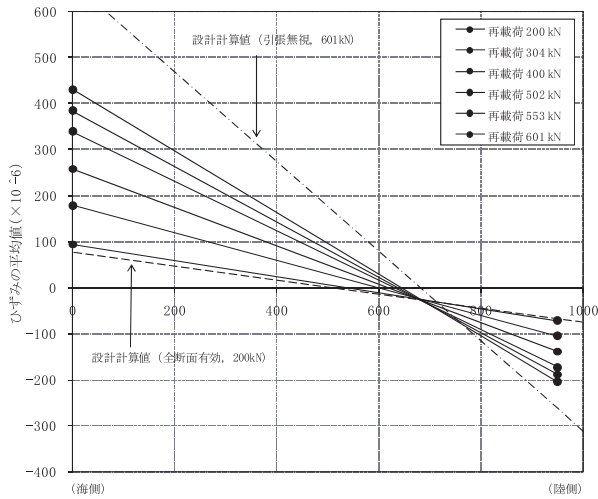
3.2.2 壁体基部の断面内ひずみ分布

図11に、ブロック2における着目点Aの高さでの断面内ひずみ分布を示す。図中に示す破線および一点鎖線は、内部コンクリートを全断面有効とした場合と引張域のコンクリートを無視した場合の設計計算値を示している。なお、壁体基部では陸側鋼板は不連続となるため設計計算に見込まず、陸側鉄筋のみを有効として計算を行っている。(a)海→陸方

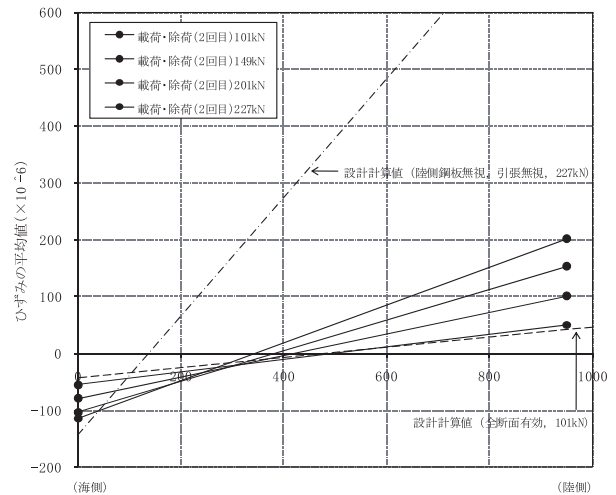
向荷重において、200kN 荷重時の実験値は、全断面有効とした設計値と良く一致している。600kN 荷重時の実験値は引張域のコンクリートを無視した場合の設計計算値を下回っているが、これは壁体内部コンクリートのテンションスティフニング効果によるものと考えられる。(b)海←陸方向荷重においても同様の傾向を示しており、101kN 荷重時の実験値は全断面有効とした設計値と良く一致し、227 kN 荷重時の実験値は引張域のコンクリートを無視した場合の設計計算値を下回っている。

図12に着目点Bの高さでの断面内ひずみ分布を示す。図中に示す破線および一点鎖線は、図11と同様に壁体内部コンクリートを全断面有効とした場合と引張域のコンクリートを無視した場合の設計計算値であるが、こちらは陸側鋼板を有効として計算したものである。(a)海→陸方向荷重では、図11(a)と同様に全断面有効から引張無視へ移行する様子が見られる。ここで、着目点Aの海側鋼板のひずみ(図11(a))と、着目点Bの海側鋼板のひずみ(図12(a))を比較すると、着目点Bの方が大きな値となっている。これは、荷重に伴って壁体に生ずる曲げモーメントは着目点Aの方が大きくなるが、着目点Bでは壁体内部にテフロンシートが貼り付けてあるため、壁体内部コンクリートへ応力伝達が殆どなされず鋼板が負担する引張応力が大きくなったためと考えられる。

図13に海→陸方向荷重における1回目荷重時の海側鋼板のひずみ履歴を示す。荷重開始直後から着目点Bのひずみ値は着目点Aよりも若干大きく、載荷荷重が300~350kNの時点では着目点A、Bともにひずみが大幅に増加している。これは壁体基部の曲げひび割れの発生に伴って断面内の応力再配分が起きたものと考えられ、着目点Bでは内部コンクリートのテンションスティフニング効果がないためにひずみの増加量が着目点Aよりも大きくなっていると考えられる。(b)海←陸方向荷重では、いずれの荷重時においても全断面有効とした設計計算値と計測結果が一致している。陸側鋼板のひずみ値が設計計算と良く一致していることから、着目点Bでは陸側鋼板が有効となっており、着目点A~Bの間で陸側鉄筋と陸側鋼板の間での荷重伝達ができていると考えられる。

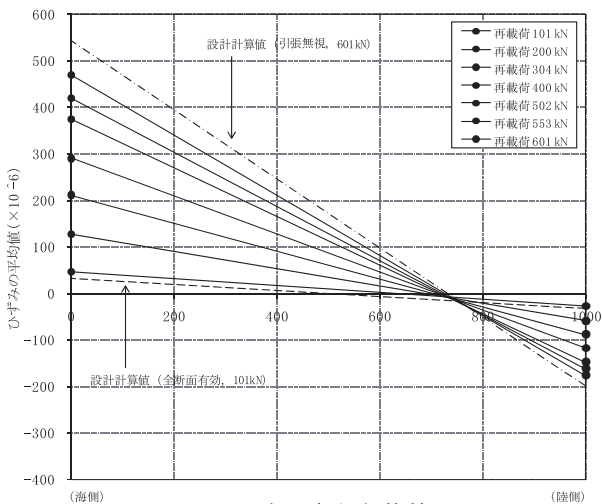


(a) 海→陸方向載荷

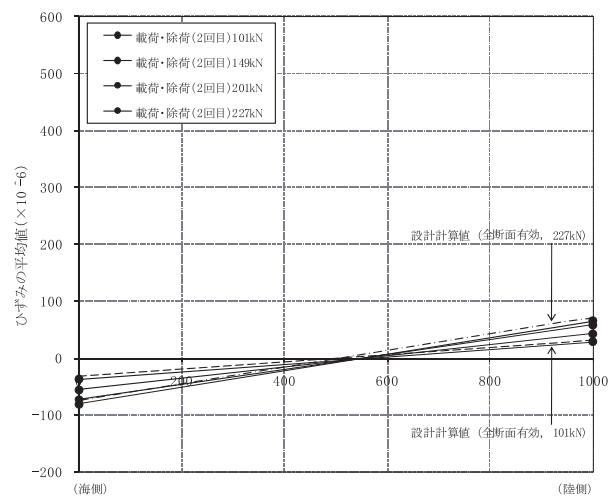


(b) 海←陸方向載荷

図11 断面内ひずみ分布 (着目点 A)
Fig. 11 Strain distribution of point A



(a) 海→陸方向載荷



(b) 海←陸方向載荷

図12 断面内ひずみ分布 (着目点 B)
Fig. 12 Strain distribution of point B

3.2.3 フーチング側面の鋼板応力度

図14に、ブロック2における「海→陸方向載荷」のフーチング側面の鋼板応力度を示す。図中に示す一点鎖線は、引張域のコンクリートを無視した場合の設計計算値である。いずれの載荷時においても、壁体基部からフーチング下面に向けて、徐々に鋼板の応力度が低下している様子が見られる。これは壁体基部で最大となる引張応力度が徐々にフーチングに伝達されて減少する様子を示しており、応力勾配が一定であることから図3に示すようなフーチング側面のスタッドの配置が概ね妥当であると考えられる。

3.2.4 壁体スタッド有無の比較

図15に、「海→陸方向載荷」における海側鋼板の荷重-ひずみ関係を示す。ブロック1とブロック2のひずみ値を比較すると、着目点Aではブロック2のひずみ値が若干小さな値を示すものの、ほぼ同程度の値を示しており、両者に大きな差異は見られない。一方、着目点Bではブロック1は全断面有効に近く、ブロック2は全断面有効と引張無視の中間的な状態となっており、両者の間に差異が見られる。これはブロック2の鋼板にテフロンシートが貼り付けているために内部コンクリートのテンションステイフニング効果が小さくなっていることを示し

ている。

図16に、「海→陸方向載荷」における着目点Aの断面内ひずみ分布を示す。ブロック1、ブロック2ともに中立軸の位置はほぼ一致しており、スタッドの有無にかかわらず鋼・コンクリート合成構造としての断面保持が成立していると考えられる。以上のことから壁体内部コンクリートと海側鋼板は壁体中間部をスタッド等で直接連結せずとも、隅角部で海側鋼板を強固に固定すれば、壁体の鉄筋レス合成構造は合成断面としての挙動を示すものと考えられる。

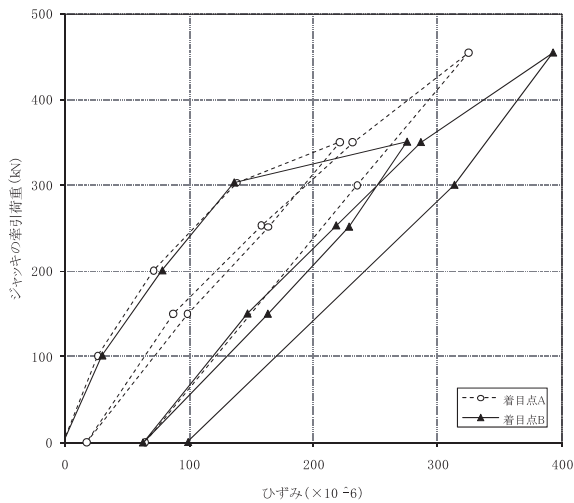


図13 海側鋼板のひずみ履歴(海→陸方向載荷、1回目)
Fig. 13 Strain history

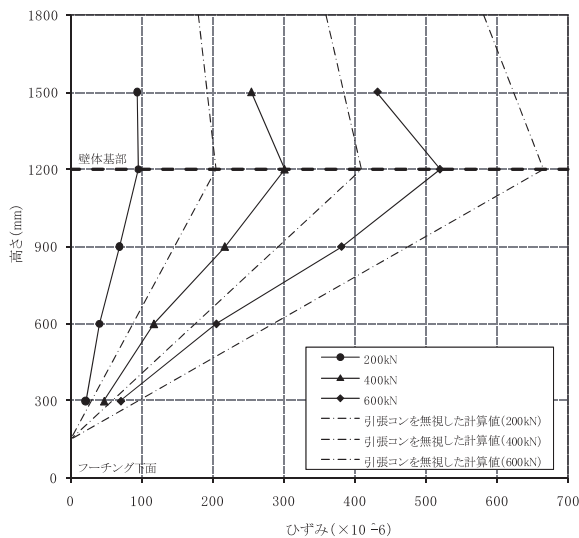


図14 フーチング側面の鋼板ひずみ分布
Fig. 14 Strain distribution of footing side

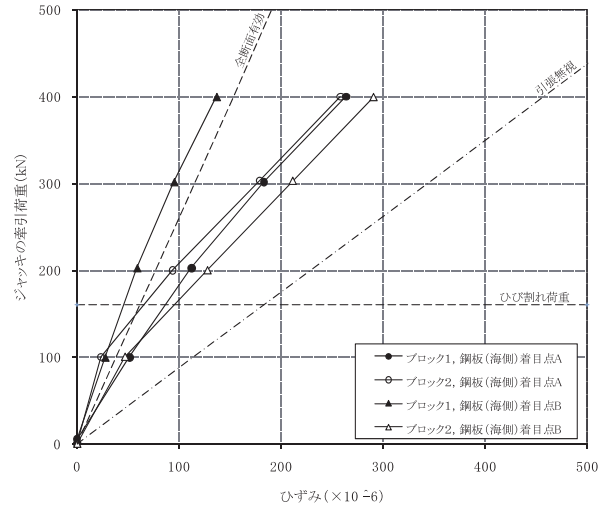


図15 荷重変位関係の比較
Fig. 15 Comparison of load-displacement relationship

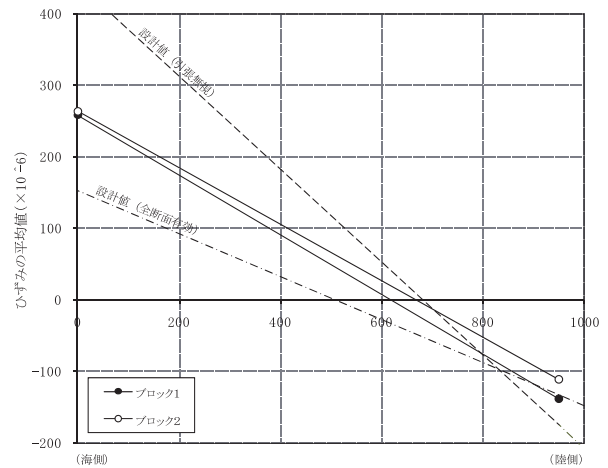


図16 断面内ひずみ分布の比較(400kN 載荷時)
Fig. 16 Comparison of strain distribution

4 結言

以上、実物大モックアップ試験体を用いた載荷試験の実験結果を元に、NSハイウォールの構造成立性の検証結果について報告した。今後は、杭施工が困難な岩盤基礎への応用やより簡易な構造への改良について検討していきたいと考える。

参考文献

- 1) 南海トラフ巨大地震の被害想定について、平成25年3月、南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ
- 2) 道路橋示方書・同解説、平成24年3月、日本道路協会